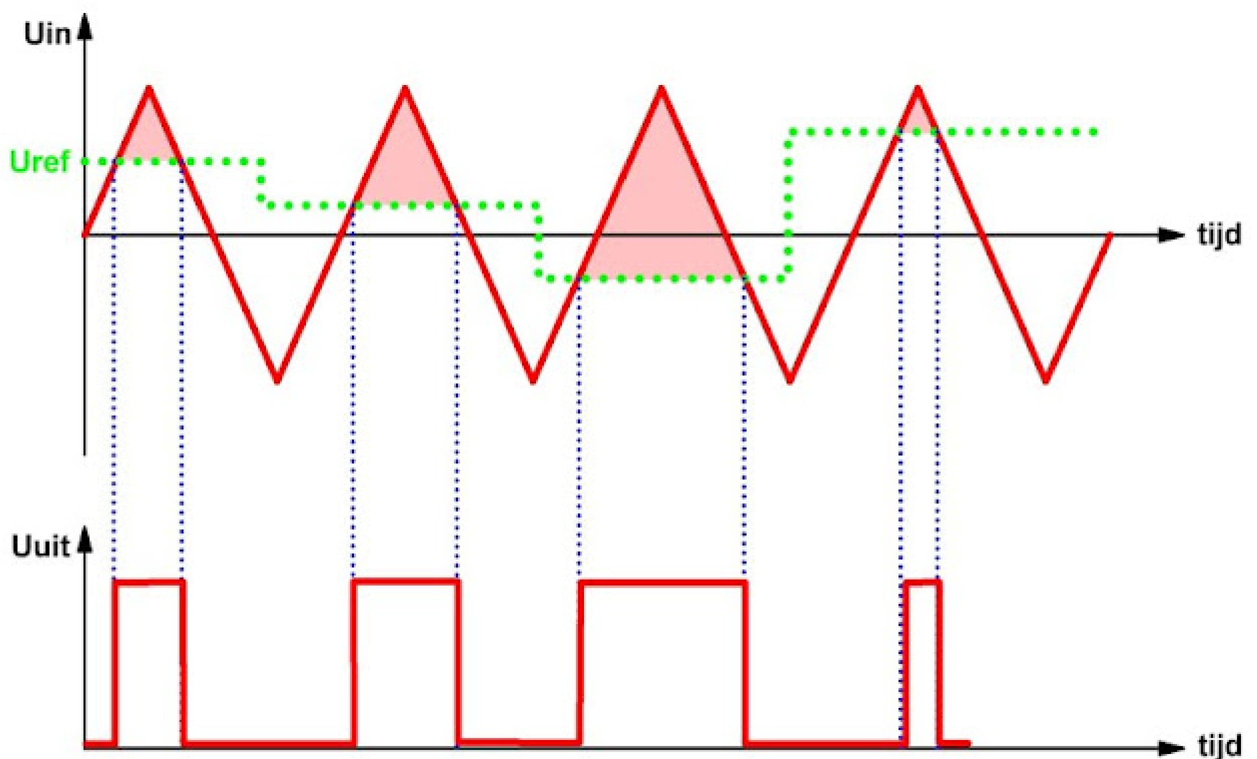
Op-amp als comparator

Comparatoren zijn schakelingen die een analoge ingangsspanning vergelijken met een vaste referentie-spanning. Dergelijke schakelingen kunt u het eenvoudigst met op-amp's samenstellen.

Auteur: Jos Verstraten, Landgraaf, Nederland
Email: josverstraten@live.nl
Publicatiedatum: 03-12-2023

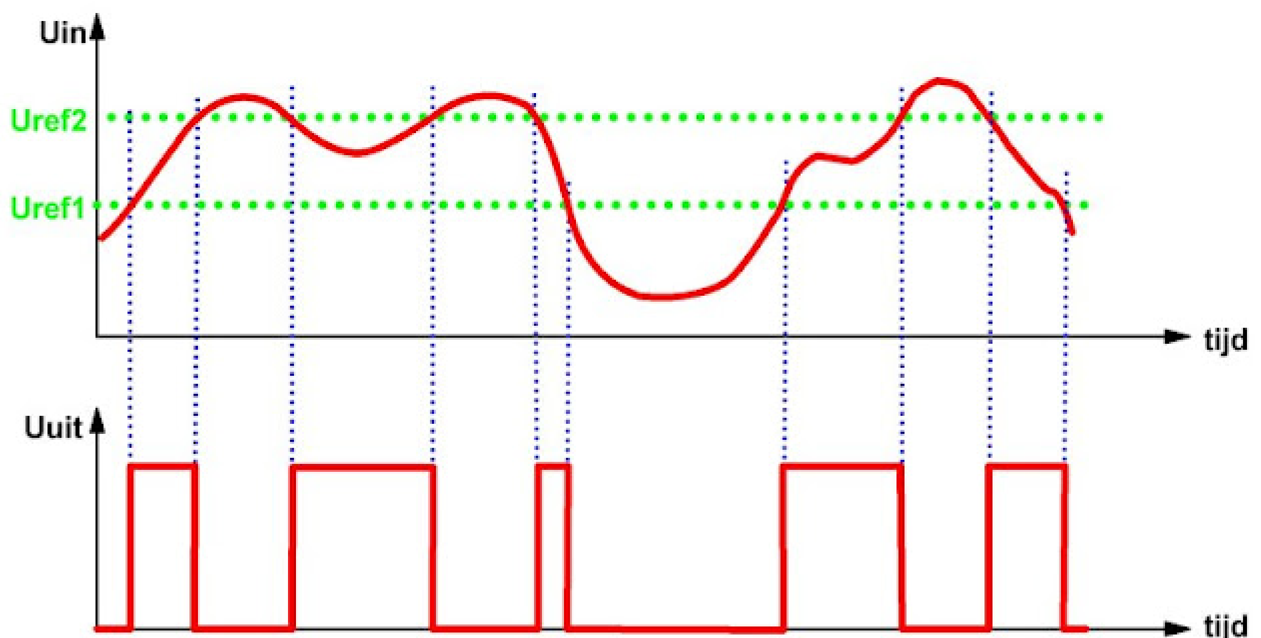
Inleidende begrippen

Wat is een comparator?
In feite is een comparator de meest eenvoudige uitvoering van een analoog-naar-digitaal omzetter. De uitgang van een comparator kent maar twee toestanden, namelijk 'L' of 'H'. In de meeste gevallen komt 'L' overeen met de massa of de negatieve voedingsspanning van de schakeling. 'H' stelt de positieve voedingsspanning van de schakeling voor.
Een comparator vergelijkt zijn analoge ingangsspanning met een bepaalde referentiespanning. Deze referentiespanning wordt de '*drempel*' van de schakeling genoemd. De ingangsspanning wordt vergeleken (gecompareerd) met de drempel en de comparator reageert door zijn uitgang om te schakelen van 'L' naar 'H' of van 'H' naar 'L'.
In de onderstaande figuur is de werking van een comparator grafisch weergegeven. Een driehoekvormige ingangsspanning U_{in} wordt vergeleken met verschillende waarden van de drempelspanning U_{ref}. In de onderste grafiek is de uitgangsspanning van de comparator getekend. Deze is 'L' als de ingangsspanning kleiner is dan de drempel en wordt 'H' als de ingangsspanning groter wordt dan de drempel.



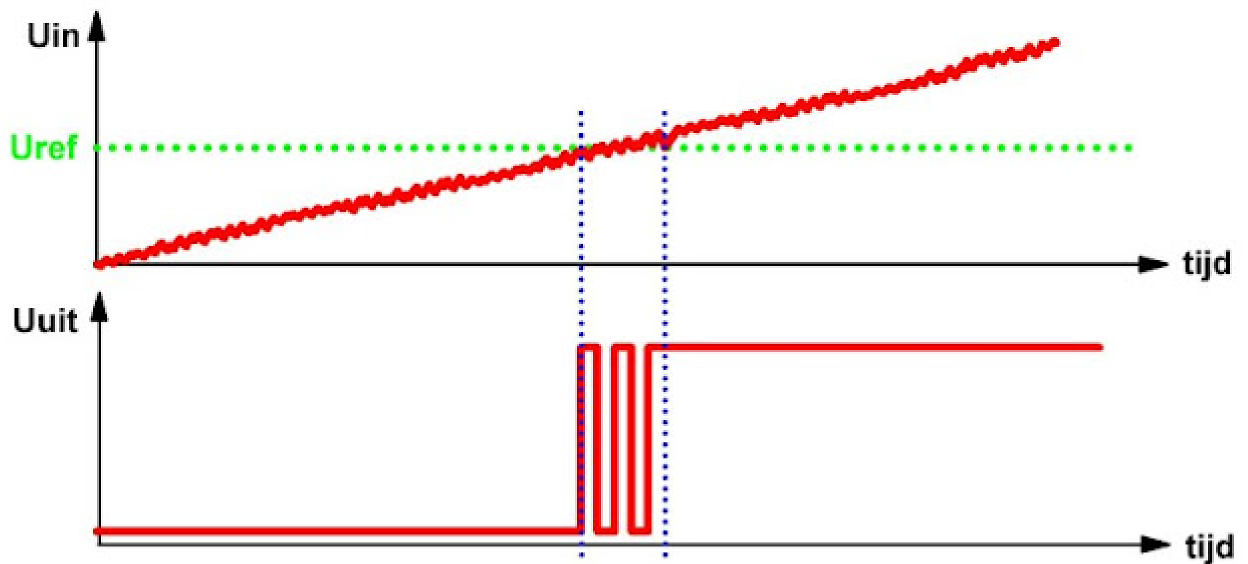
De werking van een comparator. (© 2023 Jos Verstraten)

De dubbele comparator of vensterdiscriminator
Een vensterdiscriminator is in feite niets anders dan een dubbele comparator. De analoge waarde van de ingangsspanning wordt nu in twee comparatoren vergeleken met twee drempels. Als de ingangsspanning tussen de drempels ligt, dan zal de gemeenschappelijke uitgang van beide comparatoren reageren door van 'L' naar 'H' te schakelen. Ligt de ingangsspanning buiten de drempels dan zal de uitgang weer reageren, maar nu uiteraard door van 'H' naar 'L' om te schakelen. U kunt een vensterdiscriminator echter ook zo ontwerpen dat de werking tegengesteld is.
In de onderstaande figuur wordt de werking van een vensterdiscriminator grafisch toegelicht. De twee drempels zijn hier voorgesteld door de referentiespanningen U_{ref1} en U_{ref2}. In het getekende voorbeeld gaat de uitgang naar 'H' als de ingangsspanning binnen het door de twee drempels bepaalde bereik valt. Men spreekt dan van een vensterdiscriminator met een positief venster. Uiteraard is ook een schakeling denkbaar waarbij het tegenovergestelde gebeurt. Als de uitgang 'H' wordt als de ingangsspanning buiten het bereik der drempels ligt, spreekt men van een vensterdiscriminator met negatief venster.
Met een vensterdiscriminator kunt u dus bepalen of een analoog signaal binnen of buiten een bepaald spanningsgebied ligt.



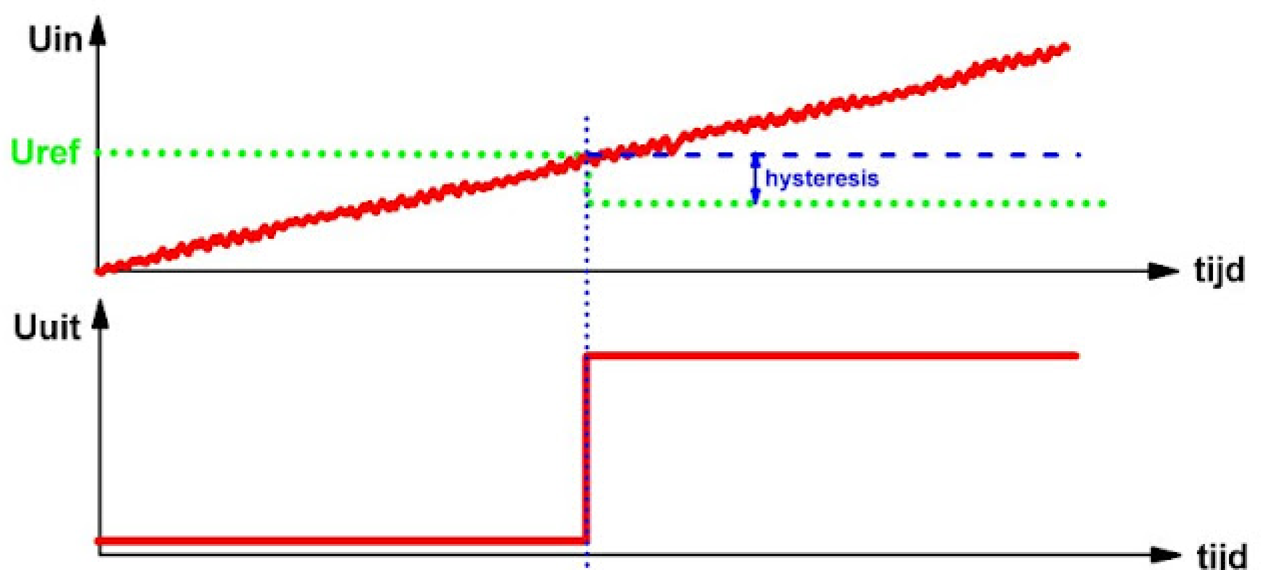
De werking van een vensterdiscriminator. (© 2023 Jos Verstraten)

De comparator met hysteresis
Bij de besproken comparator is het omschakelpunt van de schakeling zeer streng gedefinieerd. Het volstaat dat de ingangsspanning enige mV onder of boven de drempelspanning varieert om de schakeling te laten omschakelen op de uitgang. Bij sommige toepassingen is deze scherpe reactie erg nuttig. U kunt echter ongetwijfeld toepassingen verzinnen waar dit scherp omklappunt zeer vervelend is. Denk bijvoorbeeld aan een toepassing waarbij de ingangsspanning verontreinigd is met brom of ruis. Dat wil zeggen dat de gemiddelde waarde van de ingangsspanning wel traag verloopt, maar dat de spanning rond deze gemiddelde waarde snel varieert.
Als de gemiddelde waarde gelijk wordt aan de drempel van de schakeling zal de comparator omklappen. Maar omdat de reële waarde van de ingangsspanning voortdurend rond de gemiddelde waarde schommelt zal de comparator echter ook voortdurend omklappen. Op de uitgang ontstaat dus even een rechthoekspanning met een hoge frequentie.
Dit verschijnsel wordt grafisch toegelicht in de onderstaande figuur.



De noodzaak van hysteresis grafisch toegelicht. (© 2023 Jos Verstraten)

Als dit verschijnsel niet gewenst is, dan kunt u dit onderdrukken door de comparator te voorzien van een zogenaamde '*hysteresis*'. Er worden dan twee waarden van de drempelspanning gedefinieerd, die op een bepaalde afstand van elkaar liggen. Als de ingangsspanning stijgt zal de schakeling omklappen als dit signaal groter wordt dan de bovenste waarde van de drempel. De schakeling reageert onmiddellijk door de drempel te verlagen naar de onderste waarde. Kleine schommelingen op de ingangsspanning hebben dan geen gevolgen meer op de uitgang, omdat deze schommelingen de onderste waarde van de drempel nooit bereiken.
Als de gemiddelde waarde van de ingangsspanning gaat dalen zal de schakeling omklappen als de spanning voor de eerste keer kleiner wordt dan de onderste waarde van de drempel. De schakeling reageert dan weer met het verhogen van de drempel tot de bovenste waarde. Ook nu zullen kleine schommelingen op de ingangsspanning rond de gemiddelde waarde dus geen gevolgen hebben op de uitgang.
Het spanningsverschil tussen de bovenste en de onderste drempel noemt men de hysteresis van de comparator. De waarde van deze hysteresis kunt u aanpassen aan de specifieke toepassing.
In de onderstaande figuur is de werking van een comparator met hysteresis voorgesteld. Als de met ruis verontreinigde stijgende ingangsspanning voor de eerste gelijk wordt aan de drempelwaarde U_{ref} gaat de uitgang van 'L' naar 'H' en zakt de waarde van de drempel naar een lagere waarde. Als de ingangsspanning weer daalt tot deze waarde gaat de uitgang van 'H' naar 'L' en stijgt de drempelwaarde weer tot de oorspronkelijke waarde U_{ref}.



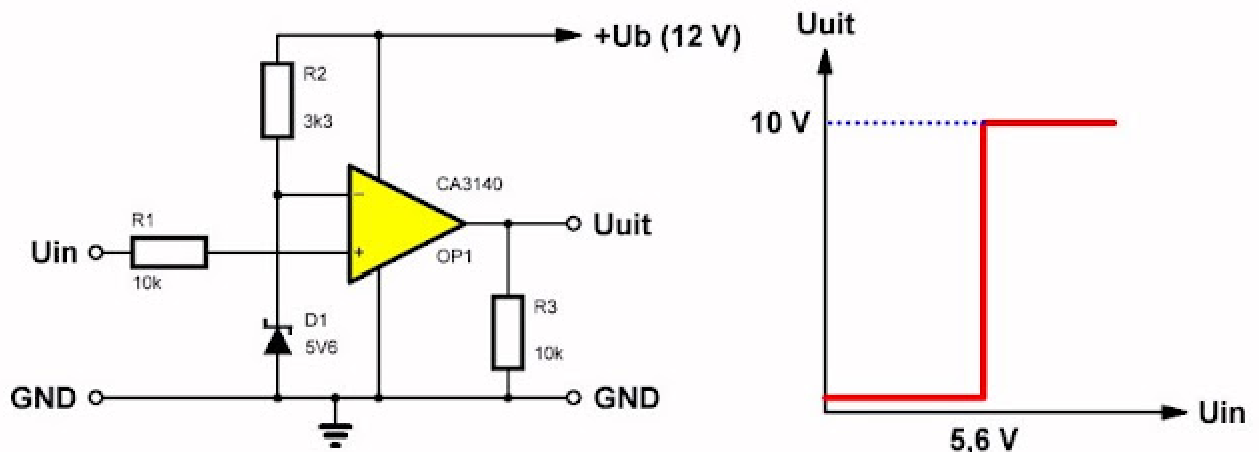
Een vensterdiscriminator versus een hysteresis-comparator
Een comparator met hysteresis is géén vensterdiscriminator! Hoewel er in de praktijk ook sprake is van twee drempelwaarden is er toch een zeer fundamenteel verschil tussen deze actie en de twee drempels waarmee een vensterdiscriminator werkt. Deze twee drempels zijn namelijk volledig onafhankelijk van elkaar en blijven constant.
Bij een comparator met hysteresis is er maar één drempel, waarvan de waarde wordt aangepast door de schakeling zélf.
In principe is het ook mogelijk de drempels van een vensterdiscriminator ieder te voorzien van een hysteresis, zodat de vensterdiscriminator schakeling vier waarden voor de drempels krijgt. Maar ook dan stelt u maar twee drempels vast en bepaalt u voor iedere drempel een bepaalde hysteresis.

Toepassingen van comparatoren
Comparatoren treft u in de praktijk vaak aan in de regeltechniek. Een eenvoudig voorbeeld is de elektronische regeling van de kamertemperatuur. Door middel van een temperatuursensor wordt de kamertemperatuur omgezet in een analoge spanning. Deze spanning wordt in een comparator vergeleken met een drempelspanning die staat voor de gewenste kamertemperatuur. Levert de temperatuursensor bijvoorbeeld een spanning van 100 mV per °C, dan moet u de drempel voor een kamertemperatuur van 20 °C instellen op 2,0 V. Als de kamertemperatuur 19 °C is dan is de sensorspanning gelijk aan 1,9 V. Op het moment dat de kamertemperatuur gelijk wordt aan 20 °C zal de sensorspanning gelijk worden aan 2,0 V en dus gelijk worden aan de drempel van de comparator. De uitgang van de comparator schakelt om van het ene digitale niveau naar het andere. Deze actie kunt u gebruiken voor het uitschakelen van de ketel van de centrale verwarming.
Daalt de kamertemperatuur onder de 20 °C, dan gaat de sensorspanning lager worden dan 2,0 V. De comparator klapt nu weer om en de ketel wordt ingeschakeld.
Om te voorkomen dat de ketel voortdurend in- en uitschakelt als de kamertemperatuur iets onder en iets boven 20 °C komt, wordt bij dit soort toepassingen steeds gebruik gemaakt van een comparator met een hysteresis.
U gebruikt vensterdiscriminatoren als, zoals reeds geschreven, u wilt weten of de momentele waarde van een signaal binnen of buiten een spanningsgebied valt. Een typisch toepassingsvoorbeeld van een vensterdiscriminator is bijvoorbeeld een schakeling die de spanning over een loodaccu controleert. Over een geladen accu moet een spanning van minimaal 11,0 V en maximaal 14,8 V staan. Is de accuspanning kleiner of groter dan deze grenzen, dan wordt de accu ofwel te veel ontladen ofwel te veel geladen. Met een vensterdiscriminator kunt u een alarmschakeling ontwerpen die een alarm stuurt als de accuspanning te laag of te hoog wordt. De vensterdiscriminator zal, naar keuze, ofwel een 'L' ofwel een 'H' op zijn uitgang genereren als de accuspanning het toegelaten gebied verlaat.

Schakelingen van comparatoren

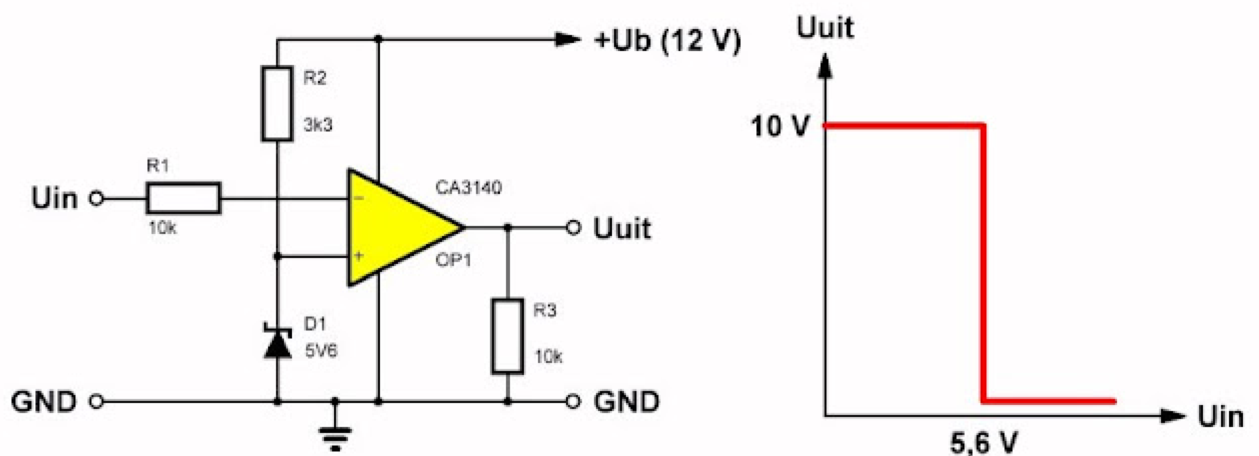
De comparator met positieve uitgangsreactie
Het basisschema van een comparator met positieve uitgangsreactie is getekend in onderstaande figuur. De comparator bestaat uit een operationele versterker zonder terugkoppeling. Uit de algemene theorie van de werking van operationele versterkers kunt u dus afleiden dat de uitgangsspanning gelijk zal zijn aan het spanningsverschil tussen beide ingangen vermenigvuldigd met de open lus versterking van de op-amp. Deze laatste is erg groot, ligt meestal boven de 100.000. Het zal dus duidelijk zijn dat zelfs een spanningsverschil tussen de twee ingangen van enige mV leidt tot het vastlopen van de uitgang tegen de positieve of de negatieve voedingsspanning. Dit kleine spanningsverschil wordt immers minstens 100.000 maal versterkt! De inverterende ingang van de operationele versterker wordt aangesloten op de drempelspanning. In dit voorbeeld wordt deze gegenereerd door een zenerdiode D1. De drempel U_{ref} is in dit geval gelijk aan de

zenerspanning, dus 5,6 V. De ingangsspanning wordt verbonden met de niet-inverterende ingang. De voorschakelweerstand R1 beschermt de operationele versterker tegen een te grote ingangsspanning. De transferkarakteristiek van de schakeling is rechts in de onderstaande figuur getekend. De transferkarakteristiek geeft het verband tussen de ingangsspanning (horizontaal) en de uitgangsspanning (verticaal) van de schakeling.
Zolang de ingangsspanning kleiner is dan de zenerspanning zal de spanning op de inverterende ingang groter zijn dan de spanning op de niet-inverterende ingang. De uitgang van de operationele versterker loopt dan vast tegen de negatieve voeding, in dit geval de massa.
Op het moment dat de ingangsspanning gelijk wordt aan de zenerspanning wordt de spanning op de inverterende ingang kleiner dan de spanning op de niet-inverterende ingang. Het gevolg is dat de uitgang van de operationele versterker vast loopt tegen de positieve voedingsspanning, dus 'H' wordt.



Basisschema van de comparator met positieve uitgangsreactie. (© 2023 Jos Verstraten)

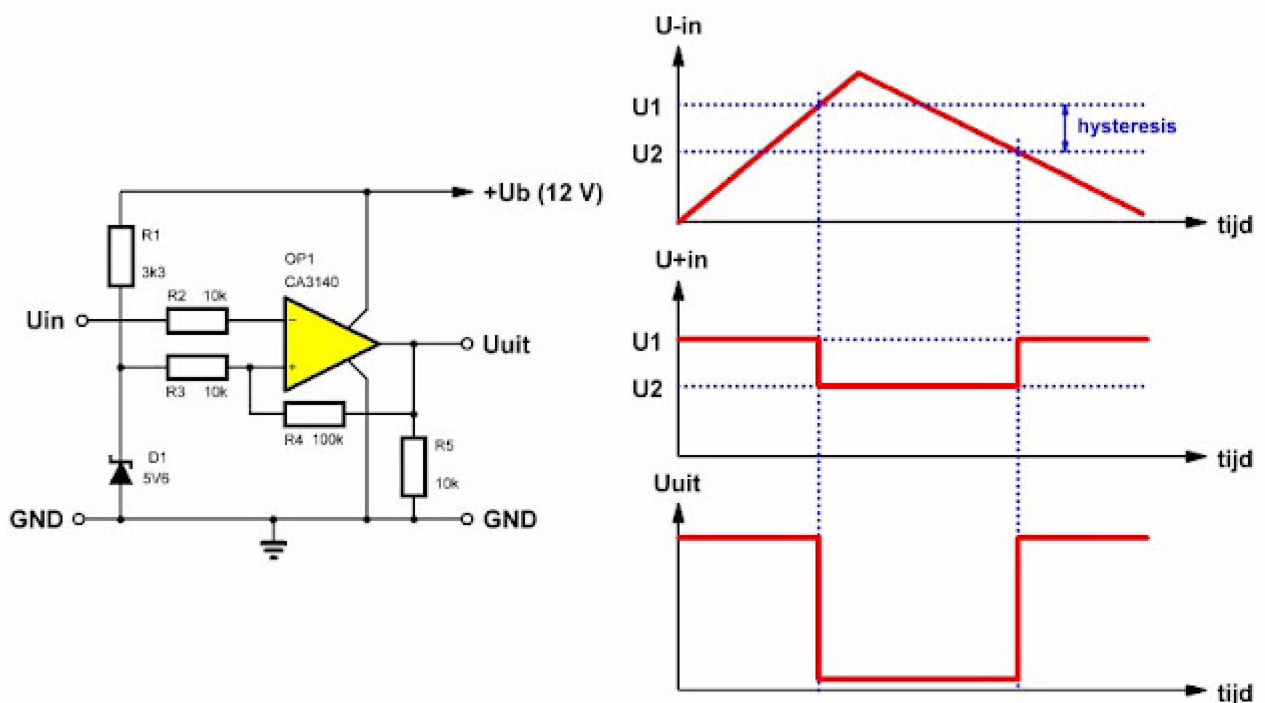
De comparator met negatieve uitgangsreactie
Het basisschema van deze schakeling is getekend in de onderstaande figuur. Zoals u ziet is het enige verschil met de vorige schakeling dat de signalen op de twee ingangen van de operationele versterker worden omgewisseld. De referentiespanning van de zenerdiode, die de drempel van de comparator bepaalt, gaat nu naar de niet-inverterende ingang. De analoge ingangsspanning wordt met de inverterende ingang verbonden. Het gevolg is dat de transferkarakteristiek wordt geïnverteerd. Als de ingangsspanning boven de drempelspanning stijgt, zal de uitgang van de comparator reageren met een negatieve sprong door van 'H' naar 'L' te gaan.



Basisschema van de comparator met negatieve uitgangsreactie. (© 2023 Jos Verstraten)

De comparator met hysteresis

Het principeschema van een comparator met hysteresis is getekend in de onderstaande figuur. De werking van de schakeling wordt toegelicht aan de hand van de rechter grafieken. De niet-inverterende ingang van de operationele versterker wordt via weerstand R3 verbonden met een referentiespanning, in dit voorbeeld +5,6 V. De inverterende ingang gaat via weerstand R2 naar de ingangsspanning. Tussen de uitgang van de operationele versterker en de niet-inverterende ingang is een weerstand R4 opgenomen. Deze weerstand is vele malen groter dan de weerstand R3. Als de ingangsspanning kleiner is dan de drempel zal de uitgang van de schakeling 'H' (+10 V) zijn. Deze spanning wordt via de weerstand R4 teruggekoppeld naar de niet-inverterende ingang. Het gevolg is dat de spanning U_1 op de niet-inverterende ingang iets groter wordt dan de referentiespanning van +5,6 V. Als de ingangsspanning groter wordt dan die spanning zal de comparator omklappen.
De uitgang gaat dan naar 'L', in dit voorbeeld 0 V. Deze spanning wordt weer via de weerstand R4 teruggekoppeld naar de niet-inverterende ingang. Het gevolg is dat de spanning op deze ingang gaat dalen naar een lagere spanning U_2. Die spanningsdaling komt overeen met de hysteresis van de schakeling. Het zal duidelijk zijn dat de schakeling nu in een stabiele stand staat.
Kleine schommelingen op de ingangsspanning hebben geen invloed, omdat de drempelspanning door de hysteresis is verlaagd.
Als de ingangsspanning weer gaat dalen zal de schakeling maar eerst omklappen als deze spanning gelijk wordt aan de onderste waarde U_2 van de drempel. Op dat moment wordt de uitgang van de schakeling weer 'H', dus +10 V en gaat de drempelspanning naar de startwaarde U_1. Ook nu is er weer een stabiele situatie gecreëerd omdat kleine schommelingen op de ingangsspanning nooit tot gevolg kunnen hebben dat de schakeling weer omklapt.

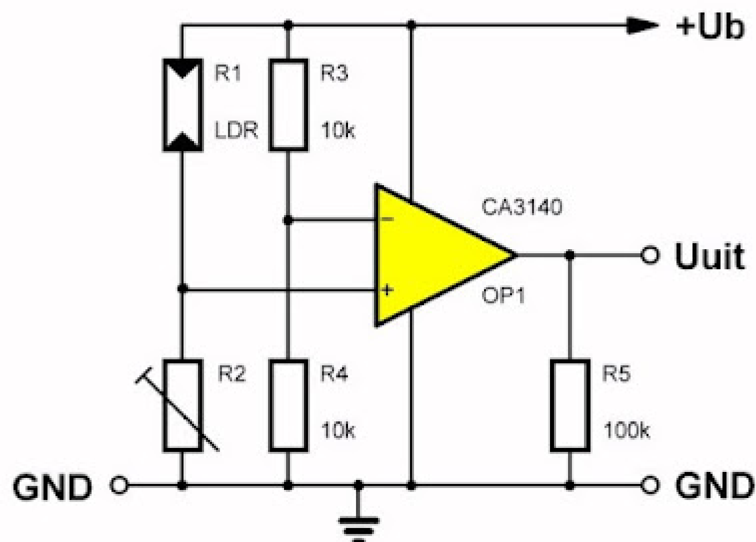


Basisschema van de comparator met hysteresis. (© 2023 Jos Verstraten)

Uiteraard kunt u de waarde van de hysteresis variëren door de verhouding tussen de weerstanden R3 en R4 aan te passen. Hoe groter de verhouding tussen deze weerstanden, hoe kleiner de waarde van de hysteresis zal zijn.
U moet onthouden dat het hysteresis-effect alleen werkt als u terugkoppelt van de uitgang naar de niet-inverterende ingang. Dat is een rechtstreeks gevolg van het feit dat de terugkoppeling geen tegenkoppeling is, maar een meekoppeling. Dat kan alleen als u terugkoppelt naar de niet-inverterende ingang.

Toepassingsvoorbeelden van comparatoren

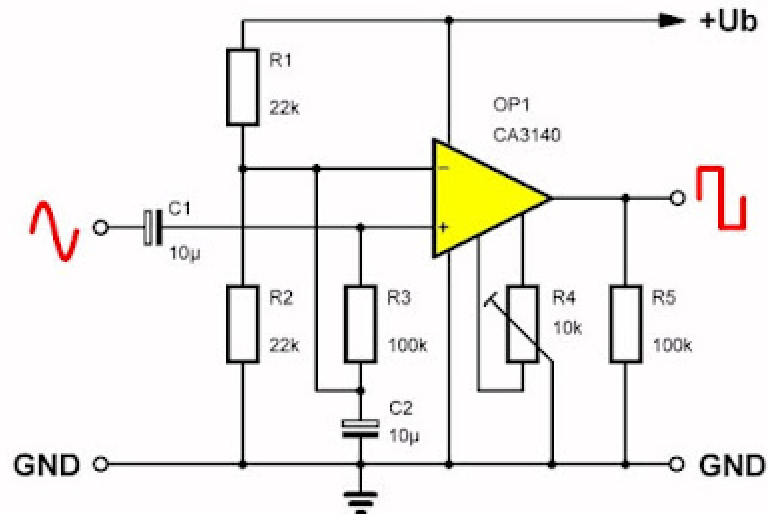
Detecteren van hoeveelheid licht
In de onderstaande figuur is een eenvoudige toepassing van een comparator getekend. De schakeling wordt gebruikt voor het detecteren van de hoeveelheid licht die op een lichtgevoelige weerstand R2, een LDR, invalt. De comparator werkt hier als schakeltrap. De inverterende ingang van de operationele versterker is aangesloten op een weerstandsdeler R3/R4. Deze legt de waarde van de drempelspanning vast op de helft van de voedingsspanning. Beide weerstanden zijn immers even groot. De LDR is ook opgenomen in een weerstandsdeler. De weerstand van de LDR vormt een weerstandsdeler met de instelpotentiometer R2. Het knooppunt gaat naar de niet-inverterende ingang van de operationele versterker. Hoe meer licht er op de LDR invalt, hoe lager zijn weerstand zal zijn. Het gevolg is dat de spanning op de niet-inverterende ingang van de op-amp stijgt met de hoeveelheid omgevingslicht.
Bij maximale belichting van de LDR zal de uitgangsspanning van de comparator 'H' zijn. Als de omgevingsbelichting daalt tot de spanning op het knooppunt van LDR en R2 daalt tot onder de drempelspanning zal de uitgang van de comparator omklappen en 'L' worden.
De waarde van de instelpotentiometer R2 is niet in te vullen omdat deze afhankelijk is van het soort LDR dat u in de schakeling soldeert. Voor de goedkope Chinese LDR's die u tegenwoordig overal kunt kopen wordt een waarde van 10 kΩ aanbevolen.
Als het de bedoeling is een langzaam variërende lichtintensiteit, zoals het omgevingslicht, te detecteren is het uiteraard aan te raden de schakeling zo uit te breiden met een extra weerstand dat er sprake is van een hysteresis. U bent nu in staat om dit zélf uit te werken.



Schakeltrap die reageert op de intensiteit van het omgevingslicht.
(© 2023 Jos Verstraten)

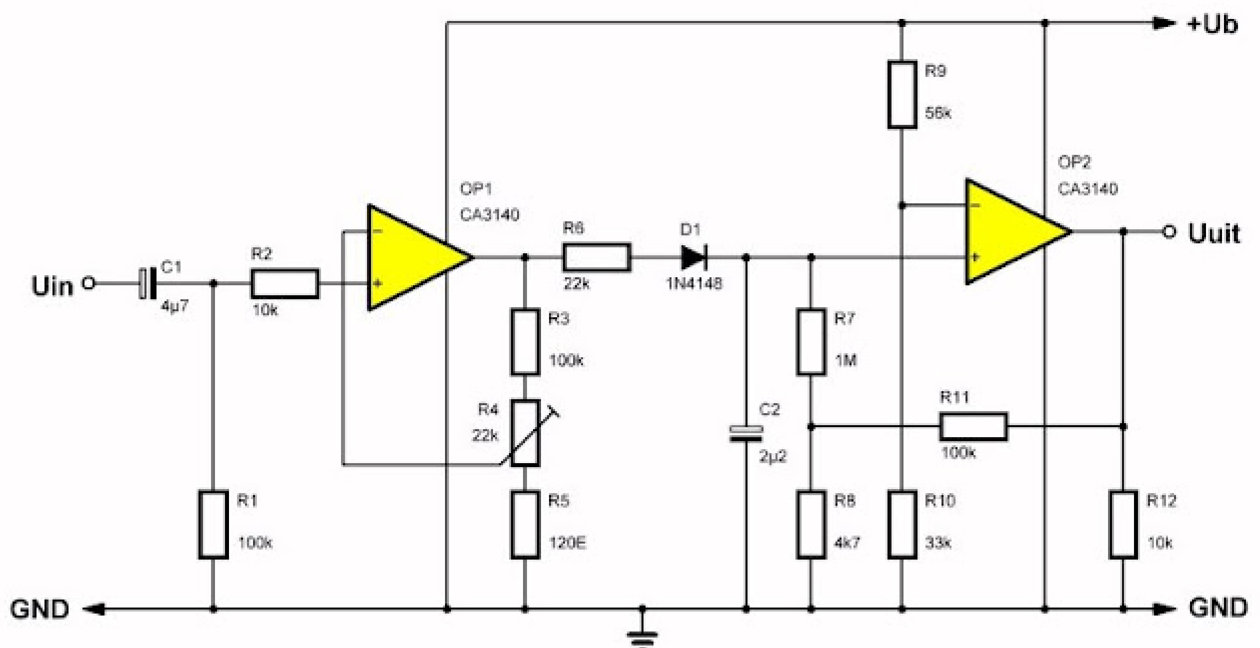
Sinus naar blok omzetter
In de onderstaande figuur wordt een comparator gebruikt om een sinusspanning om te zetten in een blokgolf. De inverterende ingang van de operationele versterker wordt door middel van de spanningsdeler R1/R2 weer ingesteld op de helft van de voedingsspanning. Deze spanning wordt ontkoppeld door de elco C2 en rechtstreeks aangeboden aan de inverterende ingang van de op-amp. De sinusoidale ingangsspanning wordt via de scheidingscondensator C1 aan de niet-inverterende ingang van de operationele versterker gelegd. Deze ingang gaat echter via de weerstand R3 naar de drempelspanning op het knooppunt van R1 en R2.
Het gevolg is dat de sinus wordt gesuperponeerd op de drempelspanning. Op het moment dat de sinus door nul gaat zal de spanning op de niet-inverterende ingang van de operationele versterker gelijk zijn aan de drempelspanning. Op dat moment schakelt de comparator om. Op de uitgang ontstaat dus een blokgolf die omschakelt van 'L' naar 'H' en van 'H' naar 'L' bij de nuldoorgang van de sinus.
Met de potentiometer R4 kunt u de offset van de operationele versterker compenseren. Met deze potentiometer is het dus mogelijk het omschakelmoment van de schakeling tot op de

mV te laten samenvallen met de nuldoorgang van de sinus op de ingang.



Een comparator zet een sinus om in een blok.
(© 2023 Jos Verstraten)

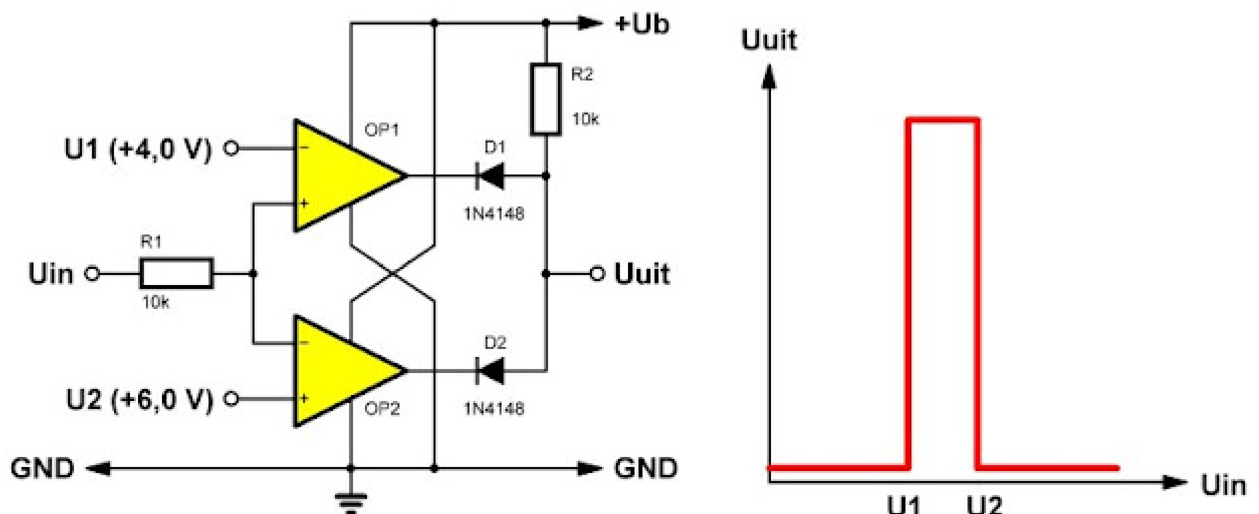
Overspanningsdetector voor wisselspanning
In de onderstaande figuur wordt een schakeling gegeven waarmee u een overspanningsdetector voor wisselspanning kunt maken. De eerste operationele versterker IC1 werkt als versterker. Nadien volgt een klassieke gelijkrichting van het versterkte signaal met de diode D1 en de afvlakelco C2. De spanning over de elco is recht evenredig met de topwaarde van de ingangsspanning.
Deze gelijkgerichte spanning wordt in een als comparator geschakelde op-amp OP2 vergeleken met een drempel, waarvan de waarde wordt bepaald door de verhouding tussen de weerstanden R9 en R10. Let ook nu op de terugkoppeling van de uitgang naar de niet-inverterende ingang middels de weerstand R11.
De waarde van de hysteresis is hier niet alleen afhankelijk van de waarde van de weerstand R11, maar ook van de verhouding tussen de weerstanden R7 en R8. U kunt eventueel deze twee weerstanden door een potentiometer vervangen.



Een overspanningsdetector voor wisselspanning. (© 2023 Jos Verstraten)

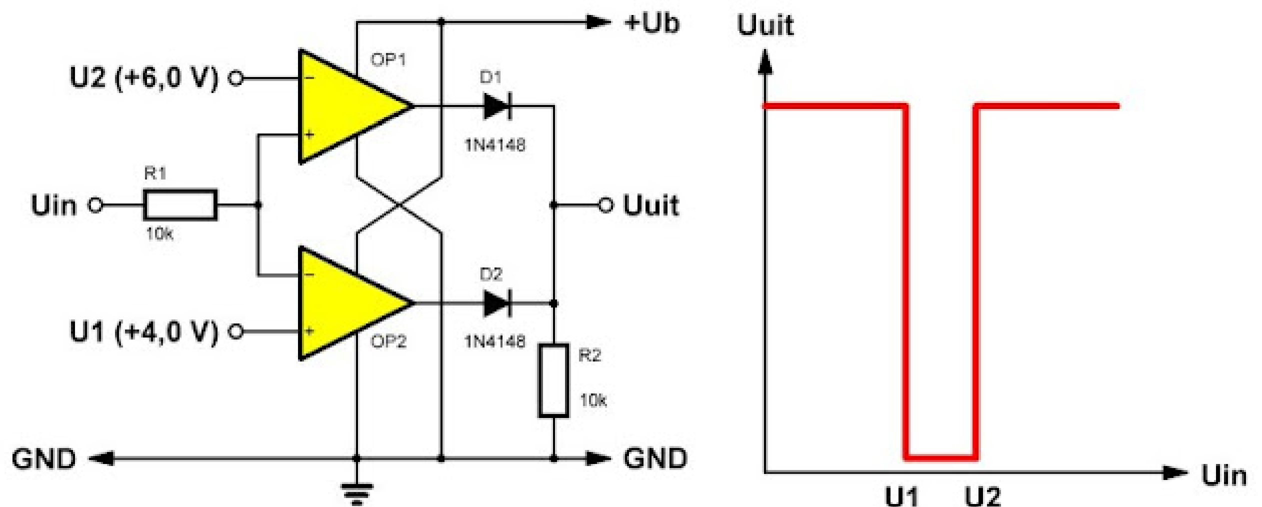
Schakelingen van vensterdiscriminatoren

De vensterdiscriminator met positief venster
Het basisschema van een vensterdiscriminator met positief venster is getekend in de onderstaande figuur. De schakeling bestaat uit twee comparatoren waarvan de uitgangen worden gecombineerd tot één gemeenschappelijke uitgang. Dat procedé is te vergelijken met het '*wired-OR*' principe dat in de digitale techniek wordt toegepast. De twee diodes D1 en D2 zorgen ervoor dat dit zonder bezwaar kan. De bovenste operationele versterker OP1 krijgt een drempel U_1 van +4,0 V aangeboden op de inverterende ingang. De onderste comparator OP2 ontvangt zijn drempel U_2 van +6,0 V op zijn niet-inverterende ingang. De ingangsspanning wordt via de weerstand R1 aangeboden aan de niet-inverterende ingang van de bovenste comparator en aan de inverterende ingang van de onderste comparator.
De schakeling werkt als volgt. Als de ingangsspanning kleiner is dan de onderste drempel van +4,0 V zal de uitgang van de bovenste operationele versterker 'L' zijn. De diode D1 gaat geleiden, er vloeit stroom door de weerstand R2 naar de uitgang van OP2 met als gevolg dat de gemeenschappelijke uitgang naar 'L' wordt getrokken. Als de ingangsspanning tussen beide drempels ligt zal de uitgang van de bovenste operationele versterker 'H' zijn. De diode D1 spert en deze diode trekt dus geen stroom door de weerstand R2. De uitgang van de onderste comparator is echter ook 'H' met als gevolg dat ook de diode D2 spert en geen stroom door R2 laat vloeien. Het algemene gevolg van beide acties is dat beide diodes sperren, er geen stroom door R2 vloeit en de uitgang 'H' wordt.
Als de ingangsspanning tot boven de bovenste drempel van +6,0 V stijgt zal de uitgang van de onderste operationele versterker 'L' worden. Nu gaat D2 geleiden en deze geleidende diode zorgt ervoor dat er door de weerstand R2 een stroom vloeit. De gemeenschappelijke uitgang van de schakeling wordt bijgevolg weer 'L'.
Besluit: de uitgang van de vensterdiscriminator is dan en alleen dan 'H' als de ingangsspanning tussen beide drempelspanningen ligt. Dit is mooi samen te vatten in de transferkarakterstiek van de schakeling, die rechts is getekend.



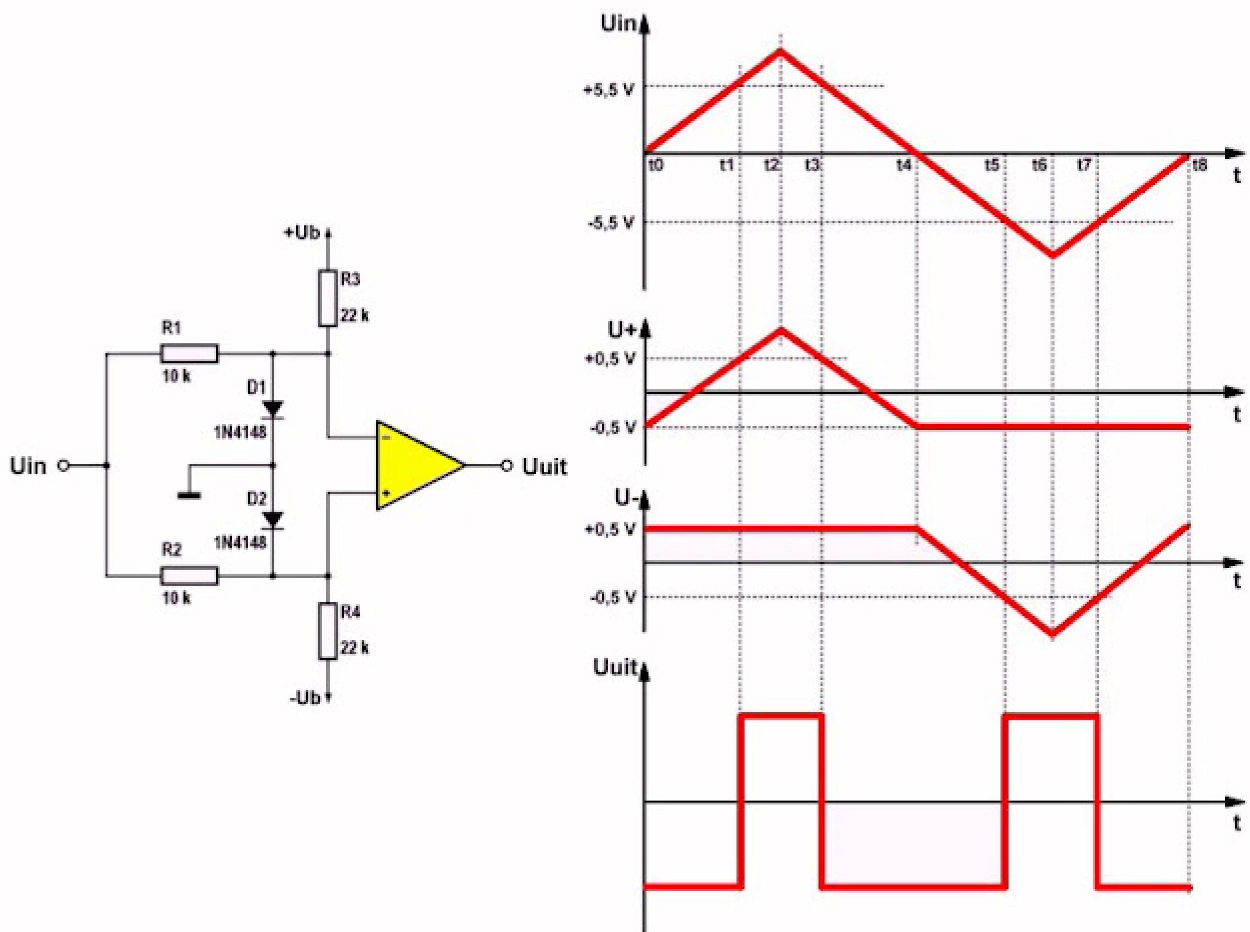
Basisschema van een vensterdiscriminator met positief venster. (© 2023 Jos Verstraten)

De vensterdiscriminator met negatief venster
In de onderstaande figuur zijn het basisschema en de transferkarakteristiek gegeven van een vensterdiscriminator met negatief venster. Het enige verschil is dat beide drempels verwisseld zijn en dat de uitgangsstructuur anders is samengesteld. De werking van de schakeling kan op dezelfde manier worden verklaard als bij de discrimator met positief venster.



Basisschema van een vensterdiscriminator met negatief venster. (© 2023 Jos Verstraten)

De vensterdiscriminator met enkele op-amp
Het voordeel van de beschreven vensterdiscriminator schakelingen is dat u de twee drempels volledig onafhankelijk van elkaar kunt instellen. In te voorbeelden lagen de drempels op +4,0 V en +6,0 V. In de praktijk is het mogelijk deze waarden aan de specifieke toepassing aan te passen. Nadeel van de schakeling is dat u twee operationele versterkers nodig hebt.
Als u de drempels symmetrisch ten opzichte van de massa kunt instellen en de schakeling bovendien uit symmetrische voedingsspanningen kunt voeden, is het mogelijk de schakeling van een vensterdiscriminator aanzienlijk te vereenvoudigen.
In de onderstaande figuur is het schema getekend van een vensterdiscriminator die maar één operationele versterker nodig heeft en de ingangsspanning vergelijkt met twee symmetrische drempels van +0,5 V en -0,5 V. De werking van de schakeling wordt toegelicht aan de hand van de grafieken, rechts in de figuur.



De twee ingangen van de operationele versterker worden ingesteld op respectievelijk +0,5 V en -0,5 V. Daarvoor zijn de siliciumdiodes D1 en D2 verantwoordelijk met hun voorschakelweerstanden R3 en R4. Deze weerstanden worden gevoed uit de positieve en de negatieve voeding en sturen de diodes met een bepaalde stroom. Over de diodes ontstaan de geleidingsspanningen die ongeveer 0,5 V groot zijn. Als de ingangsspanning van de schakeling gelijk is aan 0 V zal de uitgang van de vensterdiscriminator 'L' zijn. De inverterende ingang van de operationele versterker is dan immers positiever dan de niet-inverterende ingang en dit spanningsverschil wordt ongeveer 100.000 maal versterkt. Als de ingangsspanning stijgt zal dit verschijnsel geen invloed hebben op de inverterende ingang van de op-amp. De geleidende diode D1 zorgt er immers voor dat deze ingang constant op een spanning van +0,5 V blijft staan. De niet-inverterende ingang staat echter ingesteld op een spanning van -0,5 V.
Het stijgen van de ingangsspanning heeft tot gevolg dat er een stroom gaat lopen door de serieschakeling van de weerstanden R2 en R4. De spanning op hun knooppunt zal langzaam stijgen. Bij een bepaalde spanning op de ingang wordt de spanning op dit knooppunt gelijk aan +0,5 V. De spanning op de niet-inverterende ingang wordt dan groter dan de diodespanning op de inverterende ingang, met als gevolg dat de comparator omklapt en een 'H' op zijn uitgang zet. De grootte van de ingangsspanning waarbij dit verschijnsel optreedt wordt bepaald door de verhouding tussen de weerstanden R2 en R4. Ook de grootte van de voedingsspanning speelt daarbij een rol.
Omdat de schakeling symmetrisch is opgebouwd zal het duidelijk zijn dat hetzelfde verhaal geldt als de ingangsspanning kleiner wordt dan 0 V. Dan blijft de spanning op de niet-inverterende ingang van de operationele versterker constant op -0,5 V en zal de spanning op de inverterende ingang langzaam dalen. Als deze gelijk wordt aan -0,5 V klapt de schakeling om en de uitgang wordt positief oftewel 'H'. De ingangsspanning waarbij dit verschijnsel zich voordoet is uiteraard afhankelijk van de verhouding tussen de weerstanden R1 en R3 en van de waarde van de positieve voedingsspanning.